

GPS-TECを用いた台風におけるTEC変動の分析

著者	篠原 鉄志
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-6
発行年	2020-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00022929

GPS-TEC を用いた台風における TEC 変動の分析

ANALYSIS OF TEC FLUCTUATION IN TYPHOON USING GPS-TEC

篠原 鉄志

Tetsushi SHINOHARA

指導教員 春日 隆

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻創生科学系修士課程

The aim of study is to analyze the change of Slant TEC on the day of typhoon. Slant TEC is calculated using GPS satellite carrier delay. Slant TEC changes by day and solar wind. Carriers from GPS satellites pass through the troposphere when reaching the receiver. Therefore, it is affected by meteorological phenomena in the troposphere. This is expected to change Slant TEC. In this study, the Slant TEC change in a typhoon was considered by comparing the Slant TEC on a sunny day and on the day of the typhoon. As a result, an increase in Slant TEC on the day of the typhoon was observed. It was observed that the increase was not seen in fine weather. It was also found that this increase was not due to satellite orbit errors. Based on these, it was found that Slant TEC may increase on the typhoon day.

Key Words Total electron content, GPS, typhoon, Slant TEC

1. 研究目的と概要

地球大気構造は、明確に境界線として表すことができない。高度に応じて気温などの性質が異なる。高層大気である電離圏には、太陽放射により中性大気から弾き出された電子が多く漂っている。日本上空では高度 300km 付近で最も電子密度が高い(図 1 参照)。近年では、電離圏の電子数変化に注目した研究がいくつか報告されている。その 1 つに地震前の電離圏電子数変化が挙げられる[3][5]。国土地理院が運営する GEONET (GPS Earth Observation Network)は、日本列島に 1300 点を超える受信局を置き、全地球測位システム(Global Positioning System, GPS)の連続観測を行っている。高度約 2 万 km 上空を飛ぶ GPS 衛星から送信されたマイクロ波は、電離圏通過時に電子による遅延を受け、この遅延はマイクロ波の周波数の二乗に反比例する。これを利用し、異なる周波数のマイクロ波の遅延を比べることで衛星と受信機を結ぶ線上にある電子の総数(Total Electron Content, TEC)が求められる。また、受信機と衛星を結ぶ直線が衛星の仰角変化に伴って電離圏を斜めに通過した際の TEC を Slant TEC と呼ぶ。本稿では、この Slant TEC を用いる。TEC の変化には、昼間と夜間での半日周期で起こ

る変化、太陽風による半球全域での変化などがある。また、衛星からの搬送波は、受信機に到達する際に対流圏を通過する。対流圏では降水や雪などの気象現象が発生する。この気象現象による搬送波の反射や屈折による遅延も考えられる。本研究の目的は、GPS-TEC 法を用いて台風当日の Slant TEC を解析し、その変化を考察することである。

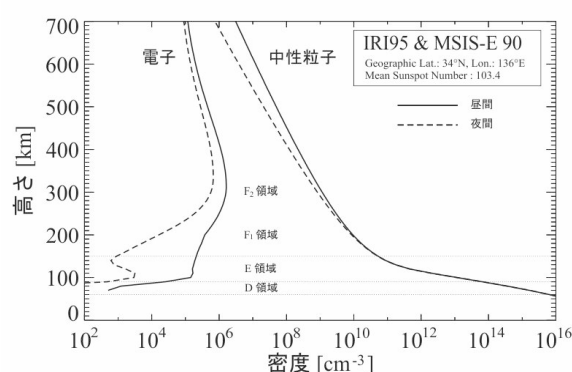


図 1 電離圏の電子密度構造[10]

2. 背景

日本は、地震源として知られる海洋プレートや活断層が数多く存在する地震大国である。近年、最も被害をもたらした地震としては 2011 年 3 月 11 日に東北地方で発生した東日本大震災が知られている。地震前の電磁気的な前兆現象が観測されれば、被害を抑えることができる。日置(2012)によると、宮崎県沖を震源地とする東日本大震災において、15 番衛星における任意の受信機間との全電子数を算出した[5]。その結果、地震発生の約 40 分前から全電子数の正の異常が生じていることを確認した。東日本大震災は、M(マグニチュード)9.0、震源深さ約 24km の地震である。また、Liu *et al.*(2009)によると、1998 年 5 月 1 日から 2008 年 4 月 30 日の 10 年間に中国で起きた M6.0 以上の 35 の地震について TEC の変動を解析した。その結果、M6.3 以上の 17 の地震で地震発生の 3-5 日前に震源地付近の TEC が減少することを示した[1]。しかし、TEC の変化は日による変化など地震以外の要因による変化が大きい。変化の要因としては、太陽風や火山噴火である。本稿では、GPS-TEC 法を用いて日本列島に台風が上陸する前後での Slant TEC 変化を観測し、気象現象での Slant TEC 変化を考察する。そのため、2019 年 10 月 6 日に南鳥島で発生し、12 日 19 時前(UT10:00)に大型で強い勢力で伊豆半島に上陸した台風 19 号における東京都青梅市上空の Slant TEC を解析した。

3. 方法

Slant TEC を算出するには、任意の受信機と GPS 衛星を決め、その衛星と受信機間のデータを用いる必要がある。衛星からの位相データには整数値の不確定バイアスがあるため、TEC の絶対値に意味はなく、時間変化に意味がある。また、GPS 衛星データから算出した Slant TEC に変化があるかを検討するためには静穏時の Slant TEC モデルが必要となる。本研究では、気象現象と Slant TEC 変化の関係を確認するため静穏時を晴天日とする。変化を読み取るため、以下の 3 つの処理を行う。

(1) RINEX データからの TEC 導出

全地球測位システム(GPS)は、衛星からの L バンド帯のマイクロ波を地上局で受信し、その搬送波位相の変化から高精度の測位を行うシステムである。日本では、地殻変動の計測を目的として稠密な連続観測網 GEONET が国土地理院によって展開されている。搬送波では、1.5GHz(L_1)及び、1.2GHz(L_2)の 2 つの周波数が同時に用いられている。ここでの L_1, L_2 は、観測された位相に波長を掛けて長さ(m)の単位に変換したものをを用いる。この(1)式による L_4

は、電離圏の情報を含んでおり、衛星位置や局位置などの情報は差を取った時点で除かれている。

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (1)$$

L_4 は視線に沿って積分した電子の数に比例するため、主に電離圏研究に用いられてきた。本稿では、日置(2010)で用いられた GPS データ共通フォーマット (Receiver Independent Exchange format, or RINEX format) の GPS 生データファイルを読み、 L_4 の時系列を作成する Fortran プログラムを用いて Slant TEC を算出する[6]。RINEX データは、国土地理院からダウンロードしたものをを用いる[9]。本プログラムは、データ本体を 30 秒毎に読み込み、任意の受信機における様々な衛星から得られた L_1 と L_2 の位相を取り出す。位相にそれぞれの波長を掛けて単位をラジアンから長さに変換し、(1)式の差から L_4 を求め、衛星毎にソートした時系列を出力する。このプログラムでは L_4 (単位 m) に(2)式のファクターを掛けて、視線方向の電子数を積分した全電子数 (Slant Total Electron Content, Slant TEC) に換算する。

$$Slant\ TEC = \left(\frac{1}{40.308} \right) \frac{(f_1^2 \times f_2^2)}{f_1^2 - f_2^2} \Delta L_4 \quad (2)$$

TEC の単位は、TECU (TEC unit, 1TECU は視線方向に沿った底面積 $1m^2$ の円柱に 10^{16} 個の電子が含まれることを意味する) を用いている。日本列島では、太陽静穏時の昼間の TEC は概ね 10-20TECU であり、夜間は数 TECU に下がる[6]。

(2) TEC 変動の評価方法

本研究では、GPS の生データから上記のプログラムを用いて算出した台風 19 号当日の Slant TEC と対流圏の気象が穏やかな晴天時 Slant TEC を解析する。台風当日と晴天時における観測受信機と衛星の組み合わせは、同一のものをを用いる。

(3) 受信機と衛星の決定

受信機と衛星の組み合わせを考える際は、観測点の任意の高度と交わる点とその点の地表への投影点を考える必要がある。これらの地点を求めて、任意の上空の TEC 変化を算出する。

本研究では、台風 19 号が東京上空を通過する 2019 年 10 月 12 日に受信機と衛星を結んだ直線が台風と交わるよう決める。台風の高度は 10-15km であるため、高度を 15km と仮定し算出する。本研究では、東京都あきる野市引田にある秋川(93063)を受信機として用い、本受信機と結んだ直線が台風

と交わる 6 番衛星を選んだ. 以下に受信機と衛星の組み合わせ決定における概略図と衛星軌道と観測点を示す.

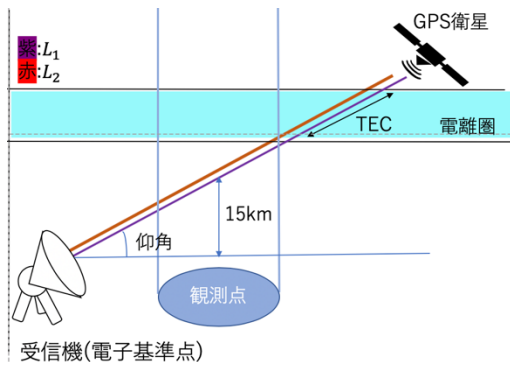


図 2 受信機と GPS 衛星の組み合わせ概略図

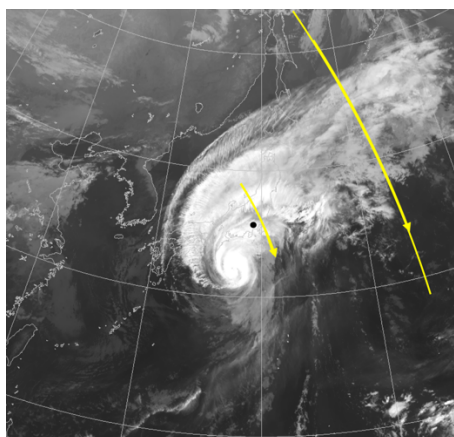


図 3 衛星軌道と受信機, 観測点の位置関係の概略図
(a)右上の黄色軌道: 6 番衛星の軌道, (b)中央黄色軌道: 観測点, (c)黒丸: 受信機(93063)
([8]の一部改変)

4. 分析対象

本研究では, 気象現象における TEC 変化を確認するため台風当日の Slant TEC を解析する. Liu *et al.* (2009) は, M6.3 以上の 35 の地震について TEC 解析を行った際, M6.3 以上の 17 の地震で地震発生前の 3-5 日前に TEC 変化が確認されたことを示した [1]. これにより, 本研究対象とする台風は, 台風による Slant TEC 変化を確認するため前後 1 週間で M6.0 以上の地震が発生していない必要がある. 台風 19 号の解析を行う 10 月 12 日の前後 1 週間における日本で発生した M5 以上および震度 4 以上の地震情報を図 4 および表 1 に示す.

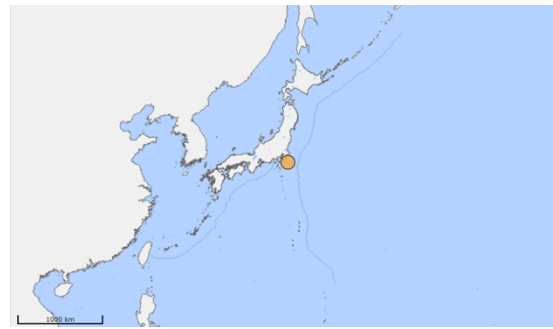


図 4 台風上陸 1 週間前後で発生した M5 以上の地震
地図上の丸は震源地[7]

表 1 台風上陸 1 週間前後で発生した M5 以上の地震

地震発生の日時	震央地名	M	最大震度
2019年10月12日 JST18:21	千葉県南東沖	M5.4	4

図 4 および表 1 より, 台風 19 号前後 1 週間に M6.0 以上の地震は発生していない.

(1) 2019 年 10 月 12 日台風 19 号について

台風 19 号は, 10 月 6 日に南鳥島近海で発生し, 12 日 19 時前(UT10:00)に大型で強い勢力で伊豆半島に上陸した. そして翌日の 13 日には, 関東地方を通過し 12 時(UT03:00)に日本の東側で温帯低気圧に変わった. また, 気象庁による台風 19 号の 10 月 12 日 9 時(UT00:00)から 10 月 13 日 21 時(UT12:00)の天気図, 衛星赤外面像, および 1 時間の降水量を図 5 に示す.

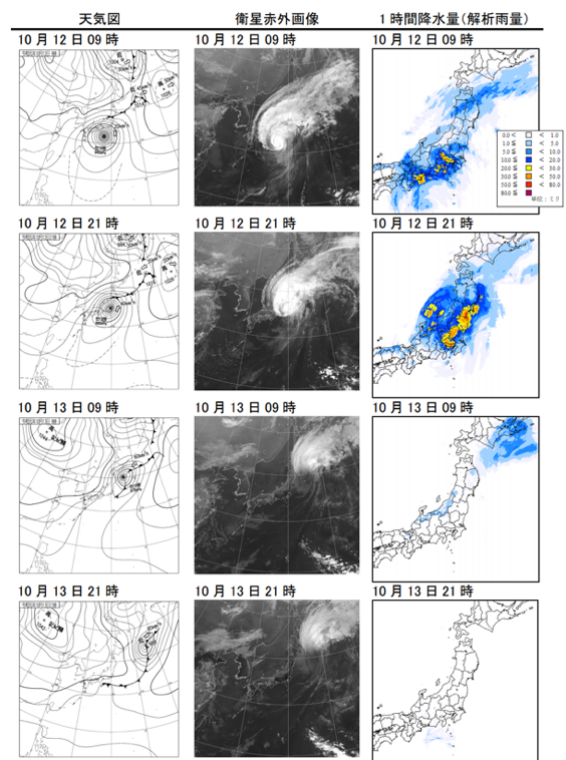


図 5 台風 19 号の天気図, 衛星赤外面像, および 1 時間の降水量[8]

図 5 より, 10 月 12 日 UT00:00 には, 東京上空に台風が到達する.

5. 分析結果

2019 年 10 月 12 日(台風当日)における東京上空の TEC

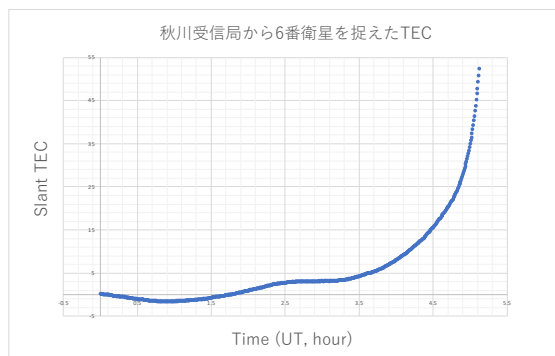


図 6 秋川(93063)と 6 番衛星による 10 月 12 日の TEC 変化

図 6 より, UT01:30 から UT03:00 において TEC の増加が見られる. また, 晴天時かつ気象画像により大気の水蒸気量が小さい時における同じ地点の Slant TEC 変化を図 7 に示す. 本地点での晴天時は, 2018 年 10 月 25 日および晴天時においても秋川(93063)受信機と 6 番衛星の組み合わせで解析を行った.

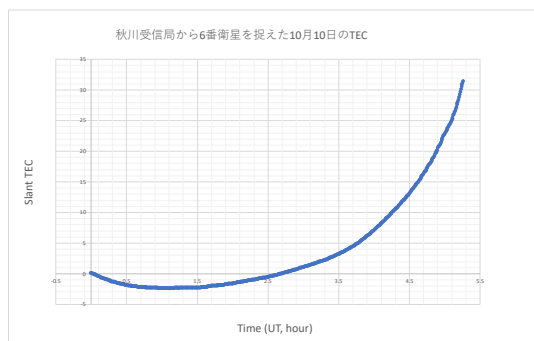


図 7 秋川(93063)から見た 2019 年 10 月 10 日の TEC 変化

図 7 より, 台風当日に見られた UT01:30 から UT03:00 の TEC の増加が晴天時には見られない. また, この増加が台風によるものではない場合を考え, 台風当日の Slant TEC で受信機と衛星を結んだ直線が高度 15km で台風と交わらない受信機と衛星の組み合わせでも解析を行った. 観測地点は, 九州地方上空である. その結果を図 9 に示す.

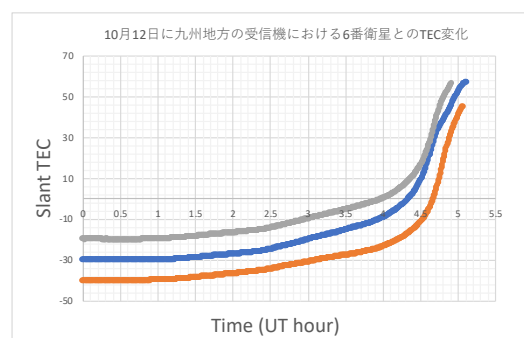


図 9 10 月 12 日に台風を通らない受信機と衛星の組み合わせで求めた TEC 変化
(a)青: 鹿児島鹿島, (b)赤: 熊本, (c)灰色: 枕崎

図 9 より, 台風を通らない受信機と 6 番衛星の組み合わせでは, 秋川(93063)と 6 番衛星の組み合わせに見られた UT01:30 から UT03:00 の TEC 増加は見られない.

また, Slant TEC は, 受信機と衛星の時間による仰角変化により変動する. そのため, 受信機と衛星を結んだ直線距離は, 時間と仰角変化に伴い Slant TEC と同様の変化をすると考えられる. 図 6 における UT01:30 から UT03:00 での TEC 増加が衛星の仰角変化に伴う増加である可能性を考え, 2019 年 10 月 10 日と 10 月 12 日における衛星と受信機間の仰角変化に伴う距離を図 10 と図 11 に示す.

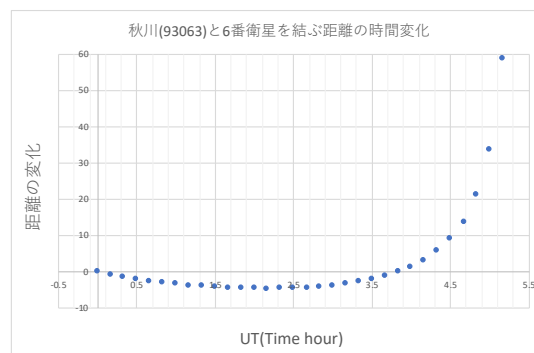


図 10 10 月 10 日における 6 番衛星との距離変化

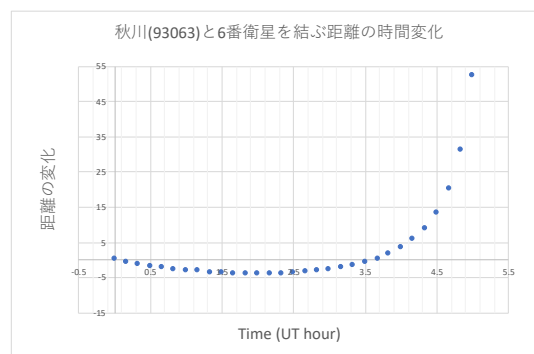


図 11 10 月 12 日における 6 番衛星との距離変化

この仰角に伴う距離の変化は, 時間分解能が 10 分である. この距離変化も Slant TEC と同様に時間および仰角変化に意味があるため, UT00:00 が 0 になるよう値を調整し

た。また、図 11 より図 6 に見られる変化は、衛星の仰角変化に伴うものではないことがわかった。

また、台風当日の日本列島上空の TEC 変化を示した NICT によるグリッドデータを図 12 に示す。

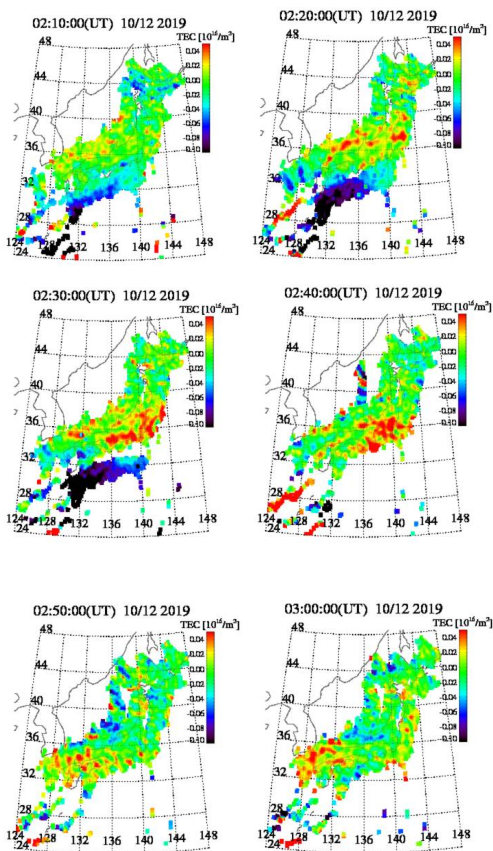


図 12 UT02:10 から UT03:00 における TEC 変化[11]

図 12 より、台風当日の図 6 に見られた UT01:30 から UT03:30 における TEC の時間変化に伴う増加を確認できる。また、増加の最大値をとる時刻である UT02:34 と図 13 における変化は類似している。図 13 は全国の受信機と衛星の組み合わせで求められたデータであるが、1 つの衛星と受信機で求めた Slant TEC と同様の時刻に変動を確認できた。

6. 考察

本研究では、GPS 衛星データの遅延から推定される TEC の台風当日での変化を検討した。TEC 変化の様々な要因は、日置(2010)で紹介されている[6]。しかし、衛星からの搬送波は受信機に到達するまでに電離圏や対流圏を通過する。その際に、対流圏における降水や雪などの気象現象においても変化が起こると考え、気象現象の 1 つである台風当日の Slant TEC を解析した。

前章で示した通り、気象情報が穏やか(上空の水蒸気量が少なく、晴天)な時の 2019 年 10 月 10 日と台風当日の 2019 年 10 月 12 日における Slant TEC 変化は異なった。Liu et al. (2009) は、M6.3 以上の地震発生 3-5 日前に TEC の擾

乱が確認されたことを示した [1]。台風 19 号上陸の前後 1 週間における M6 以上の地震は発生していない。また、火山の噴火もなく、太陽活動も静穏であり日による変化とも変動周期が異なる。このことから、気象現象でも TEC 変化は起こる可能性があると考えられる。そのため、Slant TEC を解析する際には衛星と受信機を結んだ直線が上空 10-15km を通過する時の気象情報も考慮する必要があると考えられる。

7 今後の展望と課題

本稿では、2019 年 10 月 12 日に東京に上陸した 1 つの台風について晴天時などの Slant TEC 変化の解析を行った。そのため、他の台風による Slant TEC 変化を解析して同様の結果が得られるのかを確認する必要がある。また、本研究では衛星と受信機を結ぶ直線が台風を通過する際に Slant TEC の変化を確認しているが、台風は広範囲に広がっているため、通過時にのみ増加しているのかは分からなかった。台風による変化をより正確に解析するためには、台風の降水範囲や暴風圏を定量的に捉える必要があると考えられる。

8 参考・引用文献

- 1) Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chen, C. H., Liu, C. Y., Chen, C. Y., Nishihashi, M., Li, J. Z., Xia, Y. Q., Oyama, K. I., Hattori, K., and Liu, C. H., Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, J. Geophys. Res., 144, A04302, doi:10.1029/2008JA013698, 2009.
- 2) Molchanov, O. A., and M. Hayakawa (1998), VLF signal perturbations possibly related to earthquakes, J. Geophys. Res., 103, 17,489-17,504.
- 3) 菅原守:内陸地震に先行する電離圏変動:GPS による検証, 北海道大学大学院, 2010
- 4) 関龍之介:GPS 観測点周辺における地震発生と電離圏異常との関連性解析, 群馬大学大学院理工学府, 2016
- 5) 日置幸介:巨大地震直前に増える電離圏の電子, 地震予知総合研究振興会「地震ジャーナル」 53 号, 2012
- 6) 日置幸介, 菅原守, 大関優, 岡崎郁也:GPS-TEC 法による地球物理学, 北海道大学理学院自然科学専攻, 2010
- 7) 気象庁: 震度データベース検索
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>
- 8) 気象庁: 台風 19 号による大雨, 暴風等
- 9) 国土地理院電子基準点データ提供サービス
<https://terras.gsi.go.jp/>
- 10) NICT 宇宙天気予報センター
<http://swc.nict.go.jp/>

11) NICT 電離圏ワーキンググループ
<http://wdc.nict.go.jp/IONO/>